Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 37, No. 4, Sep.-Oct. 2023, p. 575-588

The Effect of Rock Phosphate Acidification and Vermicompost on Phosphorus Release Kinetics in a Calcareous Soil

Z. Sokhanvar Mahani[1]*, N. Boroomand[2], M. Sarcheshmeh Pour[3]

Received: 27-04-2023
Revised: 13-08-2023
Accepted: 15-08-2023
Available Online: 16-08-2023

How to cite this article:
Sokhanvar Mahani, Z., Boroomand, N., & Sarcheshmeh Pour, M. (2023). The effect of acidification rock phosphate and vermicompost on phosphorus release kinetics in calcareous soil. *Journal of Water and Soil, 37*(4), 575-588. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2023.82137.1277

Introduction

Phosphorus (P) is one of the most important elements necessary for plant growth and production of agricultural products. In calcareous soils, phosphorus deficiency is a general issue due to high pH, high soil calcium carbonate content, lack of organic matter and moisture. Phosphorus absorption capacity depends on different soil reactions such as: adsorption, sedimentation, stabilization and release. The speed and amount of plant available P depends on the soil reactions. Studying the kinetics of P release from soil is a good indicator to check the status of P uptake by plant. The kinetics of P release in soils is a subject of importance in soil and environmental sciences. The aim of this research was to investigate the kinetics of P release and derive the most suitable equation to describe the release of P from a calcareous soil when subjected to the acidification of rock phosphate and the addition of vermicompost.

Materials and Methods

In order to investigate the ability of acidified rock phosphate and vermicompost in P release, an experiment was conducted with 2 replications on a light-textured soil with low OC and Olsen-P (1.2 mg/kg). One hundred grams air dried calcareous soil was transferred into special containers and 5 treatments including: 1- control (soil), 2- rock phosphate, 3- acidified rock phosphate (20 CC nitric acid 0.1 N and 5 g rock phosphate), 4- vermicompost, and 5- acidified vermicompost (20 CC nitric acid 0.1 N and 5 g vermicompost) were applied. The treatments incubated two weeks in 20±2°C temperature. The Kinetics of P release was studied by adding 20 mL of 0.5N $NaHCO_3$ to, one gram of air dried treatments. Extraction times were considered to be 0.25 h to 256 h (in 11 times) based on the time of adding the $NaHCO_3$ extractant until filtering. After adding the extractant, the samples were shaken and centrifuged. After filtering, the concentration of released P in samples were determined by spectrophotometer (Model: CE 292 Series2, ultraviolet). For higher accuracy in the measurements, acid-washed containers were adjusted based on the amount of soil moisture which was dried in the oven (105°C). Finally, the P release data were fitted to different kinetic equations. The effect of different fertilizer treatments on P release in specified times and then kinetics parameters were investigated and compared with the control.

Results and Discussion

Addition of acidified and non acidified rock phosphate and vermicompost increased the amount and speed of P release in the calcareous soil. Six kinetic equations were fitted to describe the release of P in the period of 0.25 h to 256 h from the soil to evaluate the effect of the treatments. The highest release of P was in vermicompost and acidified rock phosphate treatment, which were an organic fertilizer and a source for preparing phosphate

1, 2 and 3- Master's Degree and Associate Professors, Department of Soil Science., Faculty of Agriculture., Shahid Bahonar University of Kerman, respectively.
(*- Corresponding Author Email: Z.sokhanvar@agr.uk.ac.ir)
DOI: 10.22067/jsw.2023.82137.1277

fertilizers. To describe the release rate, kinetic equations were used. The best equations were chosen by highest coefficient of determination (R^2) and the least of standard error (SE). The zero, first, second order equations could not describe the release of P in the studied calcareous soil. The R^2 value decreased from the zero to second order equation. The simplified Elovich equation described well the release of P from the soil with the average R^2 of 0.79 and with the average SE of 0.4. Comparison of the average effect of the studied treatments with the control showed that the acidifed vermicompost and rock phosphate treatments increased the capacity and speed of P release compared to the control. On the other hand, acid addition has increased the capacity and speed of P release in the calcareous soil.

Conclusion

The findings indicated an initial rapid release of P, which then decreased over time. Notably, the application of vermicompost and the acidification of the soil with rock phosphate resulted in a pronounced and accelerated release of P. Generally, organic fertilizer treatments exhibited a higher release of P compared to chemical fertilizer treatments. This observation is in accordnce with the findings of the data presented by Ghorbanzadeh et al. (2009), who explored the P release potential of bone meal. Their data demonstrated that the acidification of bone meal accelerated and enhanced P release. To further enhance the practical relevance of these results, it is recommended to conduct this research in the presence of plants.

Keywords: Kinetics, Kinetic equations, Organic fertilizer, Rock phosphate, Vermicompost

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۲، ص. ۵۸۸-۵۷۵

تأثیر اسیدی کردن خاک فسفات و ورمی‌کمپوست بر سینتیک رهاسازی فسفر در خاک آهکی

زینب سخنور ماهانی[1*]- ناصر برومند[2]- مهدی سرچشمه پور[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۴

چکیده

فسفر یکی از مهمترین عناصر ضروری برای رشد گیاهان و تولید محصولات کشاورزی است. درخاک‌های آهکی به علت pH بالا، درصد زیاد کربنات کلسیم، کمبود مواد آلی و رطوبت؛ کمبود فسفر به صورت یک عارضه عمومی دیده می‌شود. قابلیت جذب فسفر تابع واکنش‌های مختلف خاک است. سرعت و مقدار آزادسازی فسفر قابل استفاده تابع واکنش‌های خاک و زمان انجام این واکنش‌ها می‌باشد. اطلاعات درباره سرعت آزادشدن فسفر در خاک آهکی محدود می‌باشد. مطالعه سینتیک رهاسازی فسفر از خاک شاخص خوبی برای بررسی وضعیت جذب فسفر توسط گیاه می‌باشد. هدف از این تحقیق مطالعه سینتیک رهاسازی فسفر و به دست آوردن بهترین معادله برای توجیه رهاسازی فسفر از یک خاک آهکی تحت تاثیر اسیدی کردن خاک فسفات و ورمی‌کمپوست بود. در این مطالعه به منظور بررسی توان خاک فسفات و ورمی‌کمپوست اسیدی شده در رهاسازی فسفر آزمایشی با ۲ تکرار و ۵ تیمار شامل: ۱- شاهد، ۲- خاک فسفات، ۳- خاک فسفات اسیدی شده، ۴- ورمی کمپوست و ۵- ورمی کمپوست اسیدی شده انجام شد و پس از دو هفته انکوباسیون در دمای ۲۰±۲°C میزان فسفر رهاشده نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفتومتر در زمان‌های ۰/۲۵ تا ۲۵۶ ساعت اندازه‌گیری شد. شش مدل سینتیکی برای توصیف رهاسازی فسفر مورد استفاده قرار گرفت. معادله الوویچ ساده شده با میانگین ضرایب تبیین (R^2) ۰/۷۹ و با میانگین خطای معیار (SE) ۰/۴ در تمام تیمارها رهاسازی فسفر از خاک را به خوبی توصیف کرد. نتایج نشان داد که در ابتدا رهاسازی فسفر سریع و با گذشت زمان کاهش یافت. اسیدی کردن خاک فسفات و ورمی کمپوست منجر به تسریع و افزایش رهاسازی فسفر گردید. نتایج همچنین نشان داد که با اسیدی کردن ورمی کمپوست، به دلیل کاهش pH می‌تواند موجب کاهش تثبیت فسفر در تیمارهای حاوی مواد آلی نسبت به کود شیمیایی شود و فسفر سریع‌تر از این منبع آلی رها گردد.

واژه‌های کلیدی: خاک فسفات، سینتیک، کود آلی، معادلات سینتیکی، ورمی کمپوست

مقدمه

فسفر یکی از عناصر ضروری برای گیاهان است که از دیدگاه‌های مختلف کشاورزی، زیست‌محیطی، شیمی خاک و حفاظت پایدار آن مورد توجه محققان واقع شده است (Meissner *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2004). فسفر در بین عناصر غذایی بعد از نیتروژن مهم‌ترین عامل محدود کننده تولیدات کشاورزی در بیشتر مناطق جهان و ایران می‌باشد. منابع فسفر محدود بوده و امکان اتمام آنها وجود دارد (Mahmoud Soltani *et al.*, 2011).

یکی از مشکلات عمده خاک‌های ایران کمبود فسفر است (Frišták and Soja, 2015). در خاک‌های آهکی وجود pH بالا، درصد زیاد کربنات کلسیم، کمی مواد آلی و خشکی خاک باعث شده که مقدار قابل جذب فسفر کمتر از مقدار لازم برای تأمین رشد بهینه اکثر محصولات کشاورزی باشد (Spinks and Barber, 1947; Tisdale *et al.*, 1993).

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و دانشیاران گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
(*- نویسنده مسئول: Email: Z.sokhanvar@agr.uk.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.2023.82137.1277

خاک فسفات که ماده اولیه تهیه کودهای فسفاته است جز منابع غیر تجدید شونده بوده و معادن آن در چند نقطه دنیا از جمله شمال آفریقا، ایران، ایالات متحده، روسیه، چین و مراکش یافت می‌شود که چهار کشور اخیر ۷۵ درصد خاک فسفات دنیا را تولید می‌کند (Van Kauwenbergh, 2001).

کاربرد مستقیم خاک فسفات به عنوان یک کود فسفره که از ساده‌ترین و کم هزینه‌ترین روش‌های تامین فسفر گیاه محسوب می‌شود ،عمدتا در خاک‌های اسیدی توصیه شده است، ولی در خاک‌های آهکی به علت وجود pH و کربنات کلسیم بالا، حلالیت خاک فسفات ناچیز بوده و استفاده آن ثمر بخش نیست (Salim-pour *et al.*, 2010).

به منظور کاهش هزینه‌های تولید کودهای فسفاته و کاربرد مستقیم خاک فسفات، روش‌های متفاوتی توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته است که از جمله این روش‌ها می‌توان به کاربرد خاک فسفات همراه با مواد آلی، گوگرد، اسید، سوپر فسفات، باکتری‌های حل کننده فسفات و یا باکتری‌های تیوباسیلوس اشاره نمود (Rosa *et al.*, 1989).

فسفر در خاک واکنش‌های گوناگونی مانند جذب سطحی، رسوب، تثبیت و رهاسازی دارد (Kuo and Lotse, 1972). این واکنش‌ها نقش مهمی در عرضه فسفر برای گیاهان، تعیین نیاز کودی و همچنین تعیین سرنوشت زیست محیطی فسفر و کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی دارند (Wang *et al.*, 2011). فرایندهای جذب سطحی و رسوب توسط کانی‌های کربنات کلسیم به عنوان سازوکار اصلی کاهش فراهمی فسفر در خاک‌های آهکی شناخته شده است به طوری که در غلظت‌های کم اورتو فسفات (کمتر از $10^{-4.5}$ مولار) جذب سطحی (Tunesi *et al.*, 1999) و در غلظت‌های بالاتر رسوب کانی‌های کم محلول فسفات کلسیم، بخش عمده‌ای از فسفر را به صورت غیر قابل دسترس برای گیاه تبدیل می‌کند (Delgado and Torrent, 2000).

استفاده از اسیدهای معدنی در خاک‌های آهکی به دلیل تاثیر آن‌ها در کاهش مقدار pH محلول خاک رایج می‌باشد (Bertrand *et al.*, 2006; Khorsandi, 1994; Ryan and Stroehlein, 1979). کاربرد این اسیدها در کنار کودهای شیمیایی باعث افزایش قابلیت جذب برخی عناصر غذایی شده و در نهایت منجر به افزایش عملکرد می‌شود (Mikkelsen and Jarrell, 1987; Miyamoto *et al.*, 1975). اختر و همکاران (Akhtar *et al.*, 2016) با مقایسه کاربرد سه منبع کود فسفری دی آمونیوم فسفات، سوپر فسفات تریپل و اسیدفسفریک در مزرعه گندم گزارش نمودند که بیش‌ترین عملکرد در مورد اسیدفسفریک به دست آمد. اعتمادیان و همکاران (Etemadian *et al.*, 2018) به منظور بررسی رهاسازی عناصر غذایی با مقایسه اسیدهای آلی و معدنی پنج منبع اسیدهای سیتریک، اگزالیک، استیک، سولفوریک و فسفریک با غلظت‌های ۱، ۵ و ۱۰ میلی‌مولار (۲۵ میلی لیتر محلول و ۱۰ گرم خاک) انجام دادند، گزارش نمودند از بین اسیدهای به کار رفته اسیدفسفریک بیش‌ترین تأثیر را در کاهش مقدار pHخاک داشت.

به منظور افزایش کارایی استفاده فسفر، کاربرد منابع آلی به همراه کودهای شیمیایی و یا به صورت جداگانه در مدیریت حاصلخیزی خاک مناسب‌تر از کودهای شیمیایی است (Eghball *et al.*, 2005). لذا امروزه تأکید زیادی بر به کارگیری روش‌های کشاورزی پایدار می‌شود. ماده آلی خاک از شاخص‌های مهم کیفیت خاک و از ارکان مهم کشاورزی پایدار است (Stevenson, 1994). کودهای آلی می‌توانند پویایی فسفر در خاک از طریق بلوکه کردن مکان‌های جذب و رقابت بین اسیدهای آلی با فسفر برای جذب تحت تاثیر قرار داده و جذب فسفر توسط اجزای خاک را کاهش دهد. همچنین اسیدهای آلی شکل و سرعت تبدیل کانی‌های فسفات کلسیم را تغییر داده و از این طریق فراهمی فسفر در خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهند (Uygur and Karabatak, 2009).

یکی از روش‌های مرسوم برای جبران کمبود عناصر غذایی در خاک‌های آهکی استفاده از کودهای شیمیایی حاوی این عناصر می‌باشد، اما این روش چندان تأثیرگذار نیست زیرا عناصر غذایی به سرعت به شکل غیر قابل دسترس تبدیل می‌شوند (Wiedenfeld, 2011).

با توجه به اهمیت ماده آلی در خاک و از آنجایی که در اکثر خاک‌های تحت کشت ایران، محتوای ماده آلی زیر یک درصد است، امروزه استفاده از ترکیبات آلی مختلف مانند کودهای دامی، بقایای گیاهی و ورمی کمپوست در اراضی زراعی توصیه می‌شود (Lim *et al.*, 2015b; Wei *et al.*,2020).

یکی از ویژگی‌های مثبت ورمی کمپوست که از نظر حاصلخیزی خاک اهمیت زیادی دارد، رهاسازی عناصر غذایی در خاک است (Edwards, 1995).

برای مطالعه پویایی فسفر بین فاز محلول و جامد خاک می‌توان از آزمایش‌های سینتیکی بهره گرفت، آزمایش‌های سینتیکی با هدف مطالعه ماهیت، ظرفیت و سرعت جذب و رهاسازی فسفر توسط اجزای خاک طراحی شده‌اند (Nafilu, 2009).

مدل‌های مختلفی برای توصیف داده‌های رهاسازی فسفر در خاک ارائه شده است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به مدل (Hejazi Mehrizi *et al.*, 2016) مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، الوویچ ساده، انتشار پاراوبلیک (پخشیدگی پارابولیکی) و تابع نمایی (توانی) اشاره کرد (Maqhsoodi *et al.*, 2015). در مطالعه لباف زاده (Labbafzadeh, 2021) در خاک آهکی تیمار شده با بیوچار، معادله شبه مرتبه اول و پخشیدگی درون ذره‌ای بهترین برازش را با داده‌های رهاسازی فسفر نشان داد. زرین کلاه و همکاران (Zarinkolah *et al.*, 2019) در مطالعه سینتیک رهاسازی فسفر از خاک‌های آهکی تیمار شده با منابع مختلف آلی شامل باگاس نیشکر و پوسته چوبی گردو و بیوچار آنها به

این نتیجه رسیدند معادله تابع توانی به خوبی توانست سرعت رهاسازی فسفر از خاک‌ها را توصیف نماید. سرعت رهاسازی فسفر در خاک‌های تیمار شده با بیوچار کمتر از خاک‌های تیمار شده با ترکیبات آلی می‌باشد. کاهش سرعت رهاسازی فسفر از خاک‌های تیمار شده با بیوچار در مقایسه با ترکیبات آلی نشان داد، تبدیل ترکیبات آلی به بیوچار می‌تواند موجب رهاسازی تدریجی فسفر و تامین کننده تدریجی فسفر مورد نیاز گیاه در خاک باشد. در مطالعه انجام شده توسط جلالی و رنجبر(Jalali and Rnjbr, 2010) در تعدادی از خاک‌های آهکی تیمار شده با کود شیمیایی، مدل پارابولیک بهترین برازش را با داده‌های رهاسازی فسفر نشان داد. از طرف دیگر هانسن واستراون (Hanssen and Strawn, 2003) گزارش کردند که مدل الوویچ بهترین مدل برای برازش داده‌های رهاسازی فسفر در خاک آهکی تیمار شده با کود آلی هست. مطالعات نافیلو (Nafilu, 2009) نیز نشان داد که مدل‌های الوویچ، تابع نمایی و پارابولیک به خوبی داده‌های رهاسازی فسفر را در یک خاک آلفی سول توصیف می‌کنند.

در مطالعه‌ای که قربان‌زاده و همکاران (Ghorbanzadeh *et al.*, 2009) به منظور بررسی توان پودر استخوان در آزاد سازی فسفر و تاثیر آن در رشد گیاه ذرت انجام دادند نتایج آنان نشان داد که اسیدی کردن پودر استخوان منجر به تسریع افزایش آزاد سازی فسفر گردید و نتایج حاصل کشت گیاه ذرت نشان داد اسیدی کردن پودر استخوان منجر به افزایش معنی داری در وزن خشک اندام هوایی و مقدار جذب به وسیله گیاه شد.

با توجه به مشکلات pH بالای خاک‌های آهکی، کمبود فسفر و غلظت پایین فسفر خاک به علت واکنش‌های مانند جذب سطحی، رسوب، تثبیت و کند بودن سرعت واکنش‌های رهاسازی فسفر در خاک آهکی، در این پژوهش سینتیک آزاد سازی فسفر تحت تاثیر تیمارهای خاک فسفات اسیدی و ورمی کمپوست اسیدی بررسی شد تا احتمالا به عنوان یک راهکار برای حل مشکل تغذیه فسفر در خاک آهکی مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین این مطالعه با هدف بررسی اثر اسیدی کردن خاک فسفات و ورمی کمپوست بر سینتیک رهاسازی فسفر در یک خاک آهکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

یک نمونه خاک سطحی (۳۰ cm -۰) از مزرعه دانشگاه شهید باهنر کرمان جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شد و پس از هوا خشک کردن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، آزمایش‌های اولیه از قبیل pH خاک در سوسپانسیون ۱:۱ (Thomas, 1996)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) عصاره اشباع (Rhoades, 1996)، کربن آلی خاک به روش واکلی و بلک (Black *et al.*, 1965)، بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتر (Gee and Bauder, 1986)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌شدن با اسید (Nelson, 1987)، فسفر قابل جذب به روش اولسن (Olsen and Sommers, 1982)، فسفر کل به روش تیزآب سلطانی (Hossner, 1996) و درصد اشباع (SP) با استفاده از گل اشباع (Rhoades, 1982) اندازه‌گیری شد.

سینتیک رهاسازی فسفر از خاک

برای انجام آزمایشات سینتیکی، ۱۰۰ گرم خاک هوا خشک در ظروف، ریخته شد. سپس تیمارهای آزمایشی شامل ۱- شاهد، ۲- ۵ گرم خاک فسفات، ۳- ۵ گرم خاک فسفات اسیدی شده با ۲۰ میلی لیتر اسید نیتریک ۰/۱ نرمال (Ghorbanzadeh *et al.*, 2009; Etemadian et al., 2018)، ۴- ۵ گرم ورمی کمپوست و ۵- ۵ گرم ورمی‌کمپوست اسیدی شده با ۲۰ میلی لیتر اسید نیتریک ۰/۱ نرمال (Etemadian *et al*., 2018 Ghorbanzadeh *et al.*, 2009;)، روی خاک اعمال گردید و در شیکر انکوباتور مدل SAJ 27، در دمای 20 ± 2 درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۴ روز در دو تکرار مورد استفاده قرار گرفت. شرایط خوابانیدن در شیکر انکوباتور و رطوبت خاک در مدت آزمایش تقریباً در حد ظرفیت مزرعه نگهداری شد. پس از سپری شدن مدت زمان خوابانیدن، نمونه‌ها خارج و پس از هوا خشک شدن به منظور بررسی سینتیک رهاسازی فسفر به یک گرم از نمونه‌های هوا خشک شده ۲۰ میلی‌لیتر عصاره‌گیر بی‌کربنات سدیم ۰/۵ مولار اضافه گردید. پس از افزودن عصاره‌گیر در تکان دهنده رفت و برگشتی با سرعت ۱۴۰ دور در دقیقه به مدت پنج دقیقه و سپس پنج دقیقه سانتریفیوژ کردن با سرعت ۲۵۰۰ دور در دقیقه و بلافاصله صاف کردن با کاغذ صافی ۴۲، عصاره‌گیری به روش اولسن انجام شد. زمان‌های عصاره گیری شامل ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲، ۶۴، ۱۲۸، ۲۵۶ ساعت بر مبنای زمان اضافه کردن عصاره‌گیر بی کربنات سدیم تا صاف کردن در نظر گرفته شد.

پس از قرائت غلظت فسفر در نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفتومتر دیجیتال Ultraviolet مدل Series2 CE 292، در طول موج ۸۸۰ نانومتر تعیین شد. میانگین تکرارها به عنوان غلظت فسفر رهاشده در هر زمان انتخاب گردید و نتایج بر اساس مقدار رطوبت خاک که در آون (105°C) خشک شد اصلاح گردید. سرانجام داده‌های رهاسازی فسفر با معادلات سینتیکی مختلف (جدول ۱) برازش داده شد. تاثیر تیمارهای مختلف کودی در یک زمان مشخص بر سینتیک رهاسازی فسفر و پارامترهای سینتیکی بررسی شده و با شاهد مقایسه گردید.

جدول ۱- معادله سینتیکی مورد استفاده در آزمایش

Table 1-The kinetic equation used in the experiment

معادله Equation	مدل سینتیکی Kinetic model
$\frac{dq}{dt}=k$	مرتبه صفر Zero order
$\frac{dq}{dt}=k(q_e-q_t)$	مرتبه اول First order
$\frac{dq}{dt}=k(q_e-q_t)^2$	مرتبه دوم Second order
$(q_t-q_\infty)=\frac{4}{\pi^{\frac{1}{2}}}\left(\frac{Dt^{\frac{1}{2}}}{r^2}\right)-\frac{Dt}{r^2}$	پخشیدگی پارابولیکی Parabolic diffusion
$q_t=at^b$	تابع توانی Two-constant rate
$\frac{dq}{dt}=ae^{-\beta q}$	الوویچ ساده شده Elovich

q_e و q_t به ترتیب بیانگر مقدار فسفر رهاشده در زمان تعادل و در زمان t ($mg\ P\ kg^{-1}$) و t زمان (h) ، k ثابت سرعت معادله ($mg\ P\ kg^{-1}\ h^{-1}$)، r شعاع سیلندر، D ضریب پخشیدگی ظاهری، q_∞ مقدار فسفر رهاشده در زمان بی نهایت، a و b در معادله تابع توانی به ترتیب ثابت سرعت رهاسازی فسفر اولیه ($mg\ P\ kg^{-1}\ h^{-1}$) و ضریب رهاسازی فسفر [$(mg\ P\ kg^{-1})^{-1}$]، β در معادله الوویچ ساده شده ثابت رهاسازی فسفر [$(mg\ P\ kg^{-1})^{-1}$] می‌باشند (Sparks, 1999).

تجزیه کود خاک فسفات

قابلیت هدایت الکتریکی (EC) عصاره ۱:۱ (Rhoades, 1996)، pH درسوسپانسیون ۱:۱(Thomas, 1996)، اندازه‌گیری مقدار کربن آلی به روش واکلی و بلک (Black *et al*., 1965) و مقدار فسفر کل با روش مخلوط اسید نیتریک و اسید کلریدریک (روش تیزآب سلطانی) اندازه‌گیری شد (Hossner, 1996).

تجزیه کود ورمی‌کمپوست

قابلیت هدایت الکتریکی (EC) عصاره ۱:۱ (Rhoades, 1996)، pH در سوسپانسیون ۱:۱ (Thomas, 1996)، اندازه‌گیری مقدار کربن آلی با استفاده از روش واکلی و بلک (Black *et al*., 1965) و مقدار فسفر کل به روش هضم خشک[1] اندازه‌گیری شد (Chapman and Pratt, 1961).

1- Dry ash

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. خاک مورد نظر دارای بافت سبک، آهکی و میزان ماده آلی پایین هست که از ویژگی‌های معمول خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک هست. همچنین میزان فسفر قابل جذب خاک ۱/۲ میلی گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد که نشان دهنده کمبود فسفر در خاک مورد استفاده است.

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

Table 2- Selected chemical and physical properties of the soil studied

خصوصیت Property	واحد Unit	مقدار Value
بافت خاک Texture soil	-	شن لومی
رس Clay	%	11.4
سیلت Silt	%	21.2
شن Sand	%	67.4
اسیدیته pH	-	8.2
قابلیت هدایت الکتریکی EC	$dS\ m^{-1}$	1
کربنات کلسیم معادل ($CaCO_3$) C.C.E	%	13
کربن آلی O.C	%	1
فسفرکل (P_2O_5) Total P	%	0.1
فسفر قابل جذب Olsen-P	$mg\ kg^{-1}$	1.2
درصد اشباع SP	%	28

برخی از ویژگی‌های کودهای ا ستفاده شده در این پژوهش (خاک فسفات و ورمی‌کمپوست) در جدول ۳ نشان داده شده است.

الگوی رهاسازی فسفر از تیمارها

الگوی رهاسازی فسفر از خاک در تیمارهای مورد مطالعه در شکل

۱ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، افزودن خاک فسفات، خاک فسفات اسیدی شده، ورمی کمپوست و ورمی کمپوست اسیدی شده باعث افزایش میزان و سرعت رهاسازی فسفر در خاک گردیده است.

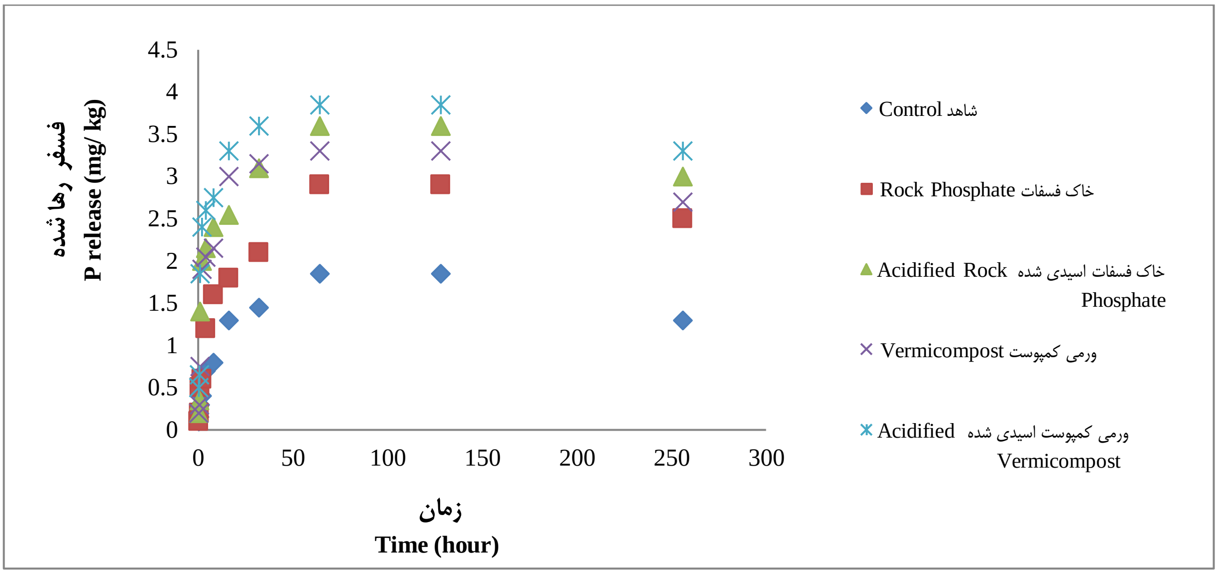
جدول ۳- برخی از ویژگی‌های کودهای استفاده شده

Table 3- Some characteristics of used fertilizers

نمونه Sample	خاک فسفات Rock Phosphate	ورمی‌کمپوست Vermicompost
اسیدیته $pH_{1:1}$	9.3	8.6
قابلیت هدایت الکتریکی($dS\ m^{-1}$) $EC_{1:1}$	1	1.7
کربن آلی (٪) O.C	0.6	1.1
فسفرکل (٪) P_2O_5 Total P	33.6	0.4

در زمان‌های اولیه، سرعت رهاسازی فسفر سریع‌تر بوده و سپس با گذشت زمان کندتر شده و به تعادل نسبی رسیده است. بارو (Barrow, 1979) در پژوهشی با استفاده از عصاره‌گیر کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار به بررسی سینتیک رهاسازی فسفر پرداخته است. وی گزارش نمود که سرعت رهاسازی در چند ساعت ابتدایی افزایش و سپس تا رسیدن به تعادل کاهش یافت. وی همچنین اظهار داشت که با افزایش نسبت محلول به خاک میزان رهاسازی فسفر نیز افزایش می‌یابد. رهاسازی فسفر در خاک را می‌توان به دو مرحله با سرعت‌های مختلف تقسیم کرد. شیب تند اولیه مربوط به زمان‌های آغازین واکنش بوده که رهاسازی فسفر عمدتا از فازهای محلول و تبادلی صورت گرفته و با کاهش غلظت فسفر به تعادل می‌رسد. به طور کلی، فرآیند رهاسازی یک عنصر در خاک تحت تاثیر عوامل متعددی از جمله یکسان نبودن انرژی مکان‌های رهاسازی، تغییرات بار سطحی پس از رهاسازی، افزایش تعداد مکان‌های خالی پس از رهاسازی و تغییر در pH و قدرت یونی قرار دارد (Elkhatib and Hrn, 1988). شکل ۱ همچنین نشان می‌دهد که در تیمارهای اعمال شده نسبت به نمونه شاهد سرعت رهاسازی تا مرحله ۹ عصاره‌گیری (۶۴ ساعت) بالا بوده و به تعادل نسبی رسیده و پس از این مرحله کاهش یافته است. در تمامی زمان‌ها میزان فسفر رهاشده از تیمارها نسبت به خاک شاهد بیشتر بود که نشان می‌دهد تیمار خاک با کودهای مورد مطالعه سبب افزایش رهاسازی فسفر در خاک شده است.

به طور کلی بیشترین افزایش در رهاسازی فسفر مربوط به ورمی کمپوست اسیدی شده طبق شکل ۱ به میزان ۳/۸۵ میلی گرم بر کیلوگرم و طبق جدول ۴ به دلیل کاهش pH بوده است.



شکل ۱- الگوی رهاسازی فسفر از تیمارها

Figure 1- Phosphorus release pattern from treatments

جدول ٤- تاثیر تیمارهای مختلف بر مقدار pH پس از افزودن تیمارها به خاک آهکی

Table 4- The Effect of different treatments on the pH after adding the treatments to calcareous soil

ورمی‌کمپوست اسیدی شده Acidified Vermicompost	ورمی‌کمپوست Vermicompost	خاک فسفات اسیدی شده Acidified Rock Phosphate	خاک فسفات Rock Phosphate	خاک شاهد Control	تیمارها Treatments
7.1	8.9	7.8	9.5	8.2	اسیدیته pH

تأثیر تیمار ها و مقایســـه معادلات ســـینتیکی مختلف در توصیف رهاسازی فسفر از خاک

سینتیک واکنش یکی از مهمترین جنبه‌های مطالعات رهاسازی عناصر در خاک می‌باشد زیرا مسیر واکنش و مکانیسم‌های درگیر در فرآیند جذب را آشکار می‌کند (Labbafzadeh, 2021). جهت توصیف رهاسازی فسفر در دوره زمانی ۰/۲۵ تا ۲۵۶ ساعت از خاک و بررسی تاثیر تیمارهای مورد مطالعه از معادلات سینتیکی مرتبه‌ای، پخشیدگی پارابولیکی، تابع توانی و الوویچ ساده شده استفاده شد. شکل‌های ۲ به ترتیب برازش معادلات سینتیکی مذکور را با داده‌های رهاسازی فسفر از خاک مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود بیشترین رهاسازی فسفر مربوط به ورمی کمپوست و خاک فسفات اسیدی شده که یک کود آلی است و یک منبع برای تهیه کودهای فسفاته است، می‌باشد. که با نتایج قربان‌زاده و همکاران (Ghorbanzadeh *et al.*, 2009) که به منظور بررسی توان پودر استخوان در آزادسازی فسفر انجام دادند، همخوانی دارد. نتایج مطالعه آنان حاکی از آن بود که اسیدی کردن پودر استخوان منجر به تسریع و افزایش آزادسازی فسفر گردید.

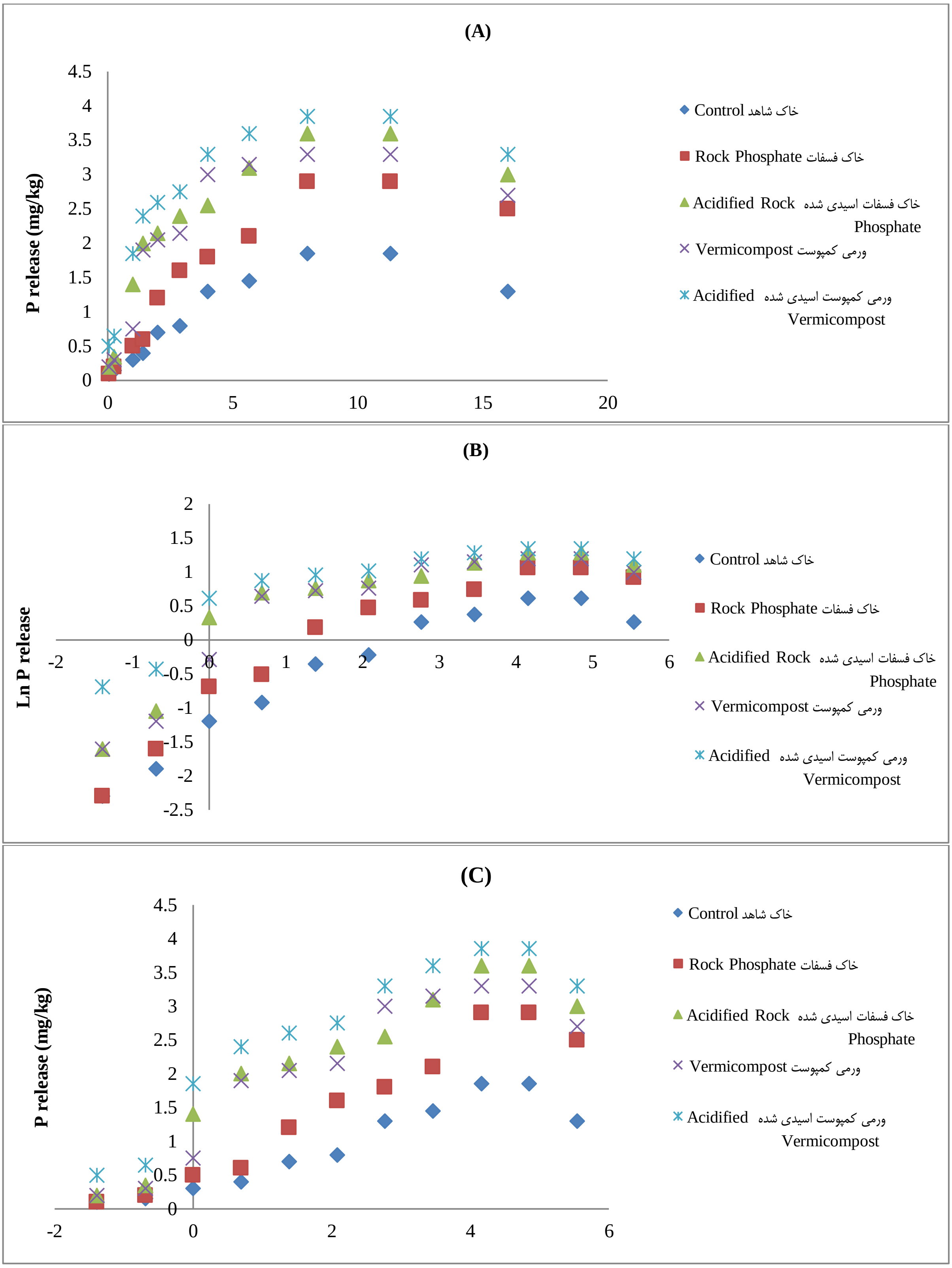
برای ارزیابی معادلات ذکر شده و انتخاب بهترین معادله توصیف کننده رهاسازی فسفر، ضرایب تبیین (R^2) و خطاهای معیار تخمین (SE) محاسبه شده برای هر معادله مورد مقایسه قرار گرفت. مدلی برتر است که ضرایب تبیین (R^2) بیشتر و خطای معیار تخمین (SE) کمتر باشد (Boroomand, 2009).

طبق جدول ۵ در همه تیمارهای مورد مطالعه معادلات الوویچ ساده شده، تابع توانی و پخشیدگی پارابولیک با دارا بودن ضرایب تبیین بالاتر و خطای استاندارد پایین‌تر نسبت به معادلات مرتبه‌ای بهترین برازش را با داده‌های رهاسازی فسفر از خاک داشتند. به عبارت دیگر معادلات الوویچ ساده شده، تابع‌توانی و پخشیدگی پارابولیک به خوبی قادر به توصیف فرآیند رهاسازی فسفر از خاک در تیمارهای مورد مطالعه بوده است. این نتایج با نتایج نافیلو (Nafilu, 2009) که به منظور رهاسازی فسفر در یک خاک آلفی سول انجام داد و همچنین با نتایج مقصودی و همکاران (Maqhsoodi *et al.*, 2015) که به منظور بررسی سینتیک رهاسازی فسفر و همبستگی پارامترهای آن با برخی ویژگی‌های خاک و رشد ذرت در چند خاک آهکی استان آذربایجان شرقی انجام دادند و با نتایج فکری و همکاران (Fekri *et al.*, 2011) نیز همخوانی دارد. بیابانکی و حسین‌پور (Biabanaki and Hossenipoor, 2007) گزارش کردند که آزادشدن فسفر با بی کربنات سدیم ۰/۵ مولار از فاز جامد خاک توسط معادلات پخشیدگی پارابولیکی، مرتبه اول و تابع نمایی به‌خوبی قابل توصیف بود. شریعت مداری و همکاران (Shariatmadari *et al.*, 2006) در خاک‌های آهکی ناحیه مرکزی ایران گزارش کردند که داده‌های سینتیکی حاصل از استخراج فسفر با کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار توسط معادله الوویچ ساده شده به بهترین نحو قابل توضیح بود و معادلات پخشیدگی پارابولیک و مرتبه اول نیز توانستند به خوبی داده‌های سینتیکی فسفر را توضیح دهند. جلالی و همکاران (Jalali *et al.*, 2011) معادله پخشیدگی پارابولیک را برای تخمین سرعت آزادشدن فسفر در خاک‌های با کاربری‌های مختلف در استان همدان مناسب دانستند.

ثابت‌های برآورد شده معادله‌های سینتیکی در تیمارهای مطالعه شده در جدول ۶ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که معادلات مرتبه ای نمی‌توانند برای توصیف آزاد شدن فسفر استفاده شوند. میانگین ثابت سرعت در معادلات مرتبه صفر، مرتبه اول و مرتبه دوم به ترتیب ۰/۰۰۷، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۱- بود.

دامنه تغییرات ضریب سرعت رهاسازی فسفر در معادله پخشیدگی پارابولیکی بین ۰/۱۷ - ۰/۱ متغیر بود. تیمار خاک فسفات اسیدی شده بیشترین و تیمار شاهد کمترین ضریب سرعت را نشان می‌دهند.

در معادله تابع توانی، دامنه تغییر پارامتر a (۱/۲۸ - ۰/۲۷) در معادله تابع توانی در خاک‌های مطالعه شده گسترده است درحالی‌که دامنه مقادیر ضریب سرعت b (۰/۴۶ - ۰/۲۶) مطالعه شده نسبتاً کوچک هستند (جدول ۶). بنابراین، احتمالاً یک افزایش در مقدار a و یک کاهش در مقدار b نشان دهنده افزایش در سرعت آزادسازی فسفر هست (Dang *et al.*, 1994).



شکل ۲- برازش معادلات سینتیکی با داده‌های رهاسازی فسفراز خاک تحت تاثیرتیمارها

(A) پخشیدگی پارابولیکی، (B) تابع توانی و (C) الوویچ ساده شده

Figure 2- Fitting Kinetic equations with phosphorus release data from soil under the influence of treatments (A) Parabolic diffusion, (B) Two-constant rate and (C) Elovich

در معادله تابع توانی، درصورتی که از معادله $q_t = at^b$ نسبت به زمان مشتق گرفته شود و t = ۱ باشد $\frac{dq}{dt} = ab$ خواهد بود، در این حالت، پارامتر ab را می‌توان به عنوان سرعت رهاسازی اولیه فسفر در نظر گرفت (Dang *et al.*, 1994) بنابراین در نظر گرفتن سرعت آزادسازی فسفر به صورت a×b مناسب‌تر هست (Raiesi and Hosseinpur, 2015). بررسی نتایج نشان داد که مقدار a×b در تیمار شاهد کمتر از a×bکه در تیمار ورمی‌کمپوست اسیدی شده بود. میانگین ثابت سرعت تابع توانی (a×b) در تیمارهای مورد مطالعه ۰/۲۲ بود.

میانگین ثابت سرعت معادله الوویچ ساده در تیمارهای مورد مطالعه ۰/۴۲ بود. ثابت سرعت رهاسازی معادله الوویچ ساده شده از ۰/۴۷ – ۰/۲۶ متغیر می‌باشد.کمترین مقدار آن در تیمار شاهد و بیشترین مقدار آن در تیمار خاک فسفات اسیدی شده، ورمی کمپوست و ورمی کمپوست اسیدی شده می‌باشد.

معادله الوویچ یک معادله تجربی و نیمه لگاریتمی است و توضیحی در مورد یک سازوکار مشخص می‌دهد (Raiesi and Hosseinpur, 2015). لیکن در برخی از منابع گزارش شده است که معادله الوویچ قادر است تعدادی از فرآیندهای مختلف از قبیل پخشیدگی سطحی را توضیح دهد (Toor and Bahl, 1999) ثابت‌های معادله‌های الوویچ ساده شده می‌توانند برای مقایسه سرعت آزادسازی فسفر در خاک‌های مختلف استفاده شوند. با افزایش مقدار α و کاهش مقدار پارامتر β سرعت آزادسازی فسفر افزایش می‌یابد (Raiesi and Hosseinpur, 2015).

طبق جدول ۶ در معادلات سینتیکی الوویچ ساده شده، تابع توانی و پخشیدگی پارابولیک و در تیمارهای ورمی کمپوست اسیدی شده و خاک فسفات اسیدی شده بیشترین ثابت‌های سینتیکی برآورد شده را دارا هستند. معادله الوویچ ساده شده با میانگین ضرایب تبیین (R^2) ۰/۷۹ و با میانگین خطای معیار (SE) ۰/۴ در تمام تیمارها رهاسازی فسفر از خاک را به خوبی توصیف کرد.

مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف در رهاسازی فسفر نسبت به شاهد

شکل ۳ مقایسه میانگین اثر تیمارهای مورد مطالعه نسبت به شاهد در افزایش رهاسازی فسفر را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می شود تیمار ورمی کمپوست اسیدی شده مورد مطالعه ظرفیت و سرعت رهاسازی فسفر به نسبت به شاهد افزایش داده است. از طرفی افزودن اسید به خاک فسفات باعث افزایش ظرفیت و سرعت رهاسازی فسفر در خاک گردیده است. از بین کودهای مورد مطالعه خاک فسفات کمترین تاثیر را بر ظرفیت و سرعت رهاسازی فسفر در خاک داشته است.

جدول ۵- مقادیر ضریب تبیین (R^2) و خطای معیار تخمین (SE) برای معادلات سینتیکی مختلف در تیمارها

Table 5- The amounts of determination coefficient (R^2) and standard error of estimation (SE) for different Kinetic equations in treatments

تیمارها Treatments		شاهد Control	خاک فسفات Rock Phosphate	خاک فسفات اسیدی شده Acidified Rock Phosphate	ورمی کمپوست Vermicompost	ورمی کمپوست اسیدی شده Acidified Vermicompost
مرتبه صفر	R^2	0.7	0.63	0.4	0.46	0.37
Zero order	SE	0.03	0.06	0.19	0.12	0.22
مرتبه اول	R^2	0.66	0.61	0.37	0.48	0.34
First order	SE	0.05	0.16	0.62	0.34	0.69
مرتبه دوم	R^2	0.64	0.59	0.34	0.5	0.32
Second order	SE	0.08	0.45	2.03	0.96	2.24
پخشیدگی پارابولیکی	R^2	0.6	0.72	0.56	0.48	0.49
Parabolic diffusion	SE	0.44	0.59	0.82	0.89	0.88
تابع توانی	R^2	0.87	0.87	0.7	0.73	0.71
Two-constant rate	SE	0.57	0.83	1.04	1.09	1.09
الوویچ ساده شده	R^2	0.87	0.86	0.7	0.83	0.71
Elovich	SE	0.26	0.27	0.44	0.51	0.5

جدول ٦- ثابت‌های معادلات سینتیکی در تیمارهای مطالعه شده

Table 6- Constants of kinetic equations in the studied treatments

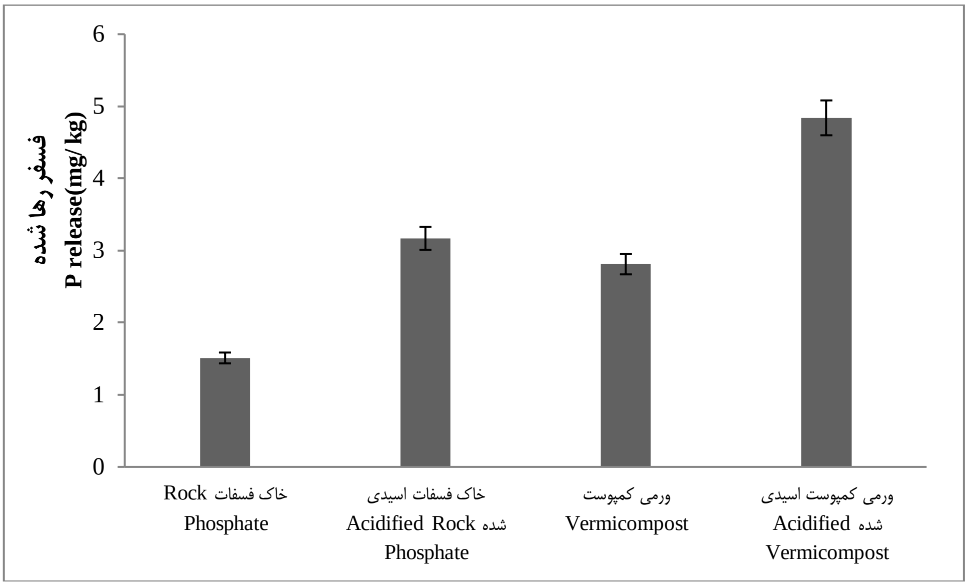
تیمارها Treatments		شاهد Control	خاک فسفات Rock Phosphate	خاک فسفات اسیدی شده Acidified Rock Phosphate	ورمی کمپوست Vermicompost	ورمی کمپوست اسیدی شده Acidified Vermicompost
مرتبه صفر Zero order	K	0.005	0.009	0.008	0.007	0.007
مرتبه اول First order	K	0.006	0.007	0.005	0.005	0.003
مرتبه دوم Second order	K	-0.001	-0.001	-0.006	-0.006	0.007
پخشیدگی پارابولیکی Parabolic diffusion	r	0.1	0.17	0.17	0.16	0.16
تابع توانی Two-constant rate	a	0.27	0.38	0.81	0.7	1.28
	b	0.41	0.46	0.35	0.37	0.26
الوویچ ساده شده Elovich	a	0.38	0.57	1.23	1.1	1.62
	β	0.26	0.44	0.47	0.47	0.47

به طور کلی اسیدی کردن ورمی کمپوست و خاک فسفات نسبت به ورمی کمپوست و خاک فسفات اسیدی نشده منجر به افزایش رهاسازی فسفر نسبت به شاهد گردید. با نتایج قربان‌زاده و همکاران (Ghorbanzadeh *et al.*, 2009) که به منظور بررسی توان پودر استخوان در آزادسازی فسفر انجام دادند همخوانی دارد. اعتمادیان و همکاران (Etemadian *et al.*, 2018) نیز گزارش نمودند که کاربرد اسیدهای آلی و معدنی در خاک باعث رهاسازی عناصر غذایی در محلول خاک می‌شود.

نتایج آزمایش همچنین نشان داد که با اسیدی کردن ورمی کمپوست، فسفر سریع‌تر از این منبع آلی رها می‌شود. کاهش pH (جدول ۴) و وابستگی رهاسازی فسفر در منابع آلی به عواملی مانند فعالیت میکروارگانیزهای خاک و شرایط رطوبتی و دما و اسیدیته خاک می‌تواند موجب کاهش تثبیت فسفر در تیمارهای حاوی مواد آلی نسبت به کود شیمیایی فسفر گردد (Ghorbanzadeh *et al.*, 2009). به عبارت دیگر، فسفر خاک در این تیمارها برای مدت زمان طولانی‌تری به شکل قابل دسترس گیاه باقی می‌ماند. همچنین مواد آلی می‌توانند مانع تشکیل فسفات‌های کلسیم، اختلال در رشد بلورها (Oconner *et al.*, 1980) و تشکیل اکتا کلسیم فسفات شوند (Moreno *et al.*, 1960). ممکن است کمپلکس کردن عوامل تثبیت فسفر (یون کلسیم) در خاک توسط ورمی‌کمپوست رخ داده باشد.از طرفی مواد آلی و اسیدهای آلی حاصل از تجزیه آنها، سطوح کربنات کلسیم را اشغال کرده و از تشکیل رسوب هیدروکسی آپاتیت جلوگیری می‌کند (Inskeep and Silvertooth, 1998).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تاثیر کاربرد خاک فسفات، خاک فسفات اسیدی شده، ورمی‌کمپوست و ورمی‌کمپوست اسیدی شده بر سینتیک رهاسازی فسفر در خاک آهکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اسیدی کردن خاک فسفات و ورمی‌کمپوست باعث افزایش رهاسازی فسفر در خاک آهکی گردید. به‌طور کلی در کودآلی میزان فسفر آزاد شده بیشتری نسبت به تیمار کود شیمیایی اندازه‌گیری شد و کمترین مقدار فسفر آزاد شده در تیمار شاهد مشاهده گردید. از طرفی کاهش pH در خاک آهکی منجر به افزایش رهاسازی فسفر شد و از طرف دیگر ممکن است کمپلکس کردن عوامل تثبیت فسفر (یون کلسیم) در خاک توسط ورمی‌کمپوست رخ داده باشد.



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف در رهاسازی فسفر نسبت به شاهد

Figure 3- Comparison of the average effect of different treatments on phosphorus release compared to the control

رهاسازی فسفر از تیمارها و شاهد در ابتدا سریع و سپس به آهستگی ادامه یافت. الگوی رهاسازی از تیمارهای مورد مطالعه نشان داد اسیدی کردن خاک فسفات و ورمی‌کمپوست باعث افزایش میزان و سرعت رهاسازی فسفر در خاک آهکی گردید. نتایج همچنین نشان داد که رهاسازی فسفر از تیمارهای مورد مطالعه روند مشابهی با شاهد داشت. با این حال، میزان رهاسازی فسفر در همه تیمارها نسبت به شاهد افزایش پیدا کرد. از بین معادلات سینتیکی، معادلات الوویچ ساده شده، تابع توانی به‌ترتیب بهترین توصیف را در رهاسازی فسفر داشتند. بر اساس نتایج به دست آمده از این مطالعه، توصیه می‌شود ازغلظت‌های مختلف اسیدها و تیمارهای مورد مطالعه در حضور گیاه استفاده شود.

منابع

1. Akhtar, M., Yaqub, M., Naeem, A., Ashraf, M., & Hernandez, V.E. (2016). Improving phosphorus uptake and wheat productivity by phosphoric acid application in alkaline calcareous soils. *Journal Science Food Agriculture*, *96*(11), 3701-3707. https://doi.org/10.1002/jsfa.7555
2. Barrow, N.J. (1979). The desorption of phosphate from soil. *Journal Soil Science*, *30*, 259-270.
3. Bertrand, I., McLaughlin, M. J., Holloway, R.E., Armstrong, R.D., & McBeath, T. (2006). Changes in P bioavailability induced by the application of liquid and powder sources of P, N and Zn fertilizers in alkaline soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *74*(1), 27-40.
4. Biabanaki, F., & Hossenipoor, A. (2007). Phosphorus release kinetics and the correlation between kinetics models constants and in some soils of Hamadan. *Journal of Science and Tehnology of Agriculture and Natural Resources*, *42*, 491-503. (In Persian with English abstract). http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-804-fa.html.
5. Black, C.A., Evans, D.D., White, J.L., Ensminger, L.E., & Clark, F.E. (1965). *Methods of Soil Analysis*. Part2. Agron. Monogr.9. American Society of Agronomy (ASA), Madison. WI.
6. Boroomand, N. (2009). *Kinetics of zinc desorption and the relations of its parameters with soil properties and uptake of zinc by plant in some soils of* Iran. Ph.D. Thesis, Tehran University, College of Agriculture and natural resources. (In Persian with English abstract)
7. Chapman, H.D., & Pratt, D.F. (1961). *Methods of analysis for soil*, plant and water. The University of California's Division of Agricultural Science. 62-66.
8. Dang, Y.P., Dala, R.C., Edwards, D.G., & Tiller, K.G. (1994). Kinetics of zinc desorption from vertisols. *Soil Science Society of American (SSSA) Journal*, *58*, 1392-1399.
9. Delgado, A., & Torrent, J. (2000). Phosphorus froms and desorption in heavily fertilized calcareous and limed soils. *Soil Science Society of American (SSSA) Journal*, *64*, 2031-2037.
10. Edwards, C.A. (1995). Historical overview of vermicoposting. *Bio Cycle*, *36*, 50-58.
11. Eghball, B., Wienhoolld, B., Woodbury, B.L., Eigenberg, R.A. (2005). Plant availability of phosphorus in swine slurry and cattie feed lot manure. *Agronomy Journal*, *97*, 542-548.
12. Elkhatib, E.A., & Hrn, J.L. (1988). Kinetics of phosohorus desorption from appalachian soils. *Soil Science*, *145*, 222-

229.
13. Etemadian, M., Hassani, A., Nourzadeh Haddad, M., & Hanifei, M. (2018). Effect of organic and inorganic acids on the release of nutrients in calcareous soils. *Journal of Water and Soil Conservation 24*(5), 73-91. (In Persian with English abstract)
14. Fekri, M., Gorgin, N., & Sadegh, L. (2011). Phosphorus desorption kinetics in two calcareous soils amended with P fertilizer and organic matter. *Environmental Earth Sciences, 64*(3), 721-729.
15. Frišták, V., & Soja, G. (2015). Effect of wood-based biochar and sewage sludge amendments for soil phosphorus availability. *Nova Biotechnologica et Chimica, 14*(1), 104-115.
16. Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). *Particle- size analysis*. In A.Klute (ed.) Methods of Soil Analysis. Part1. 2nd ed. Agron. Monogr.9. American Society of Agronomy (ASA) and Soil Science Society of American (SSSA), Madison, WI. In A. Klute (ed.). 338-409.
17. Ghorbanzadeh, N., Haghnia, G., Lakzian, A., & Fotovat, A. (2009). Phosphorus availability in a soil amended with Bone Meal. *Iranian Journal of Soil Research, 23*(1), 69-77. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/IJSR.2009.126657
18. Hanssen, J.C., & Strawn, D.G. (2003). Kinetics of phophate release from manure-amened alkaline soil. *Soil Science, 168*, 869-879.
19. Hejazi Mehrizi, M., Ayeeneheydari, M., & Abbaszadeh, F. (2016). An investigation of phosphorus dynamics in a calcareous Soil treated with different levels of poultry manure and chemical fertilizer. *Water and Soil, 26*(3.1), 293-303. (In Persian with English abstract)
20. Hossner, L.R. (1996). *Dissolution for total elemental analysis*. In: Methods of soil analysis. (Ed. D.L. Sparks). American Society of Agronomy (ASA) and Soil Science Society of American (SSSA). Madison, WI. 49-64.
21. Inskeep, W.P., & Silvertooth, J.C. (1998). Inhibition of hydroxy apatite precipitation in the presence of fulvic, humic and tannic acids. *Soil Science Society of American Journal*, *52*, 941-946.
22. Jalali, M., Ahmadi, N., & Zinli, M. (2011). Kinetis of phosphorus release from calcareous soils under different land use in Iran. *Journal of Plant Nutrition and Soil Sciene, 174*, 38-46.
23. Jalali, M., & Rnjbr, F. (2010). Aging effect on phophorus Transformation rate soils. *Geoderma, 155*, 101-106.
24. Khorsandi, F. (1994). Sulfuric acid effects on iron and phosphorus availability in two calcareous soils. *Journal Plant Nutrition*, *17*(9), 1611-1623.
25. Kuo, S., & Lotse., E.G. (1972). Kinetics of phosphate adorption by calcium carbonate and Ca- kaolinite. *Soil Science Society of American (SSSA). Proc. 36*, 725-729.
26. Labbafzadeh, A. (2021). *Investigation of phosphorous release and fractionaion in a calcareous soil treated by coffee waste biochar. Iran*. MS.c Thesis, Shahid Bahonar University of Kerman. Faculty of Agriculture. (In Persian with English abstract)
27. Lee, C.H., Park, C.Y., Do Park, K., Jeon, W.T., & Kim, P.J. (2004). Long-term effects of fertilization on the forms and availability of soil phosphorus in rice paddy. *Chemosphere, 56*(3), 299-304.
28. Lim, S.L.,Wu, T.Y., Lim, P.N., & Sak, K.P.Y. (2015b). The use of vermicompost in organic farming: Overview, effects on soil and economics. *Journal of the Sience of Food and Agriculture, 95*(6), 1143-11565.
29. Mahmoud Soltani, Sh., Davatgar, N., Kavoosi, M., & Darighgoftar, F. (2011). Phosphorous fractionation of paddy fields and their relations with physical and chemical properties of soils (Case study: Some-e-Sara city, Guilan province). *Journal Water and Soil Conservation, 18*(2), 159-176. (In Persian with English abstract)
30. Maqhsoodi, M.R., Reyhanitabar, A., & Najafi, N. (2015). Kinetics of phosphorus release and correlation of its parameters with soil properties and corn growth in some calcareous soils of East Azerbaijan province. *Appled Soil Research (ASR), 2*(2):119-134. (In Persian with English abstract)
31. Meissner, R., Leinweber, P., Rupp, H., Shenker, M., Litaor, M.I., Robinson, S., Schlichting, A., & Koehn, J. (2008). Mitigation of diffuse phosphorus pollution during rewetting of fen peat soils: a trans-European case study. *Water, Air, and Soil Pollution, 188*(1-4), 111-126.
32. Mikkelsen, R.L., & Jarrell, W.M. (1987). Application of urea phosphate and urea sulfate to drip-rrigated tomatoes grown in calcareous. *Soil Science Society of American (SSSA) Journal, 51*(2), 464-468.
33. Miyamoto, S., Ryan, J., & Stroehlein, J.L. (1975). Potentially beneficial uses of sulfuric acid in southwestern agriculture. *Journal of Environmental Quality, 4*(4), 431-437.
34. Moreno, E.C., Lindsay, W.L., & Osborn, G. (1960). Reactions of dicalcium phosphate dihydrate in soils. *Soil Science, 90,* 58-68.
35. Nelson, R.E. (1987). *Carbonate*, In: Black,C.A. (eds.). Methods of Soil Analysis. Part2. Agron . Monogr. 9. American Society of Agronomy (ASA), Madison.WI.P. 182-192.
36. Nafilu, A. (2009). Effects of soil properties on the kinetics of desorption of phosphate from Alfisol by anion exchange resins. *Journal Plant Nutrition Soil Science, 175*, 101-107.
37. Oconner, G.A., Knudsten, K.L., & Connell, G.A. (1986). Phosphprus solubility in sludgeamended calcareous soils. *Journal Environmental Quality*, *15*, 308-312.
38. Olsen, S.R., & Khasawneh, F.E. (1980). *Use and limitations of physical– chemical criteria for assessing the status*

of phosphorus in soils. American Society of Agronomy (ASA). Madison, WI. 361-410.
39. Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1982). *Phosphorus*. In: A.L.Page(ed.). Methods of Soil Analysis. Part2. Agron. Monogr. 9. American Society of Agronomy (ASA), Madison. WI. 403-431.
40. Raiesi, T., & Hosseinpur, A.L. (2015). The influence of bean rhizosphere on phosphorus release kinetics in calcareous soils of Shahrekord plain. *Journal of Water and Soil, 25*(4.2), 67-80. (In Persian with English abstract)
41. Rhoades, J.D. (1996). *Salinity*: Electrical conductivity and total dissolved soilds. In: Black, C. A (ed.). Methods of Soil Analysis. Part2. Agron. Monogr. 9. American Society of Agronomy (ASA) and Soil Science of American (SSA), Madison. WI. 417- 435
42. Rhoades, J.D. (1982). *Soluble Salts*. In- A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney (eds.). Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. 2nd ed. Agron.Monogr. 9. American Society of Anesthesiologists (ASA) and Soil Science Society of American (SSSA), Madison, WI. 167-179.
43. Rosa, M.C., Muchovej, J., & Muchovej Alvarez, V.H. (1989). Temporal relation of phosphorus fraction in an oxiol amended rock phosphate and Thiobacillus thiooxidans. *Soil Science Society of American (SSSA) Journal, 53*, 1096-1100.
44. Ryan, J., & Stroehlein, J.L. (1979). Sulfuric acid treatment of calcareous soils: Effects onphosphorus solubility. Inorganic phosphorus forms and plant growth. *Soil Science Society of American (SSSA) Journal, 43*(4), 731-735.
45. Salim-pour, S., Khavazi, K., Nadian, H., & Besharati, H. (2010). Effect of rock phosphate along with sulfur and microorganisms on yield And chemical composition of Canola. *Iranian Journal of Soil Research, 24*(1), 9-19. (In Persian with English abstract)
46. Shariatmadari, H., Shirvani, M., & Jafari, A. (2006). Phosphorus release kinetics and availability in calcareous soils of selected arid and semiarid Toposequence. *Geoderma, 132*, 261-272. https://doi.org/10.1016/jgeoderma.2005.05.011
47. Sharpley, A.N., McDowell, R.W., & Kleinman, P.J. (2004). Amounts, forms,and solubility of phosphorus in soils receiving manure. *Soil Science Society of America Journal, 68*(6), 2048-2057.
48. Sparks, D.L. (1999). *Kinetics of soil phenomena*. Future directions. In:P. M. Huang. D. L. Sparks and S. A. Boyd (ed.). Future Prospecs of soil chemistry. Soil science society of America Spec.Pub. Soil science society of America.Madison.WI. 81-102.
49. Spinks, J.W.T., & Barber, S.A. (1947). Study of fertilizer uptake using radioactive phosphorus. *Science Agronomy, 27*, 145-155.
50. Stevenson, F.J. (1994). *Humus chemistry: Composition, reactions*. John Wiley & Sons.
51. Thomas, GW. (1996). *Soil pH and soil acidity*. In: Sparks DL (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3 Chemical Methods. Soil Science Society of American (SSSA), Madison, Wisconsin, USA. 475- 491.
52. Tisdale, S.L., Nelson, W. L., Beaton, J.D., & Havlin, J.L. (1993). *Soil Fertility and Fertilizers*, 5th ed. Mcmillan Publishing Co., New York.
53. Toor, G.S., & Bahl, G.S. (1999). Kinetics of. Phosphate desorptionfrom different soils as influenced by application of poultry manure and fertilizer phosphorus and its uptake by soybean. *Bioresearch Technology, 69*, 117-121.
54. Tunesi, S., Poggi, V., & Gessa, C. (1999). Phosphate adsorption and percipition in calcareous soils: The role of calcium ions in solution and carbonate minerals. *Nutrition Cycl Agroecosystem, 53*, 219-227.
55. Uygur, V., & Karabatak, I. (2009). The effect of organic amendments on mineral phosphate fractions in calcareous soils. *Journal Plant Nutrition Soil Science, 172*, 336-345.
56. Van kauwenbergh, S.J. (2001). Mineralogy and characterization 0f phosphate rock for direct application. International Meeting on Direct Application Rock Phosphate and Related Appropriate Technology-Iatest Development and Practical Experienes. Kuala Lampur, Malaysia.
57. Wang, L., Liang, T., Kleinman, P.J.A., & Cao, H. (2011). An experimental study on using rare earth elements to trace phosphorous losses from nonpoint sources. *Chemosphere Journal, 85*, 1075-1079.
58. Wei, X.X., Xiong, J.F., Li,T.,Wen, J., Zeng, X.B., & Yu, D.H. (2020). Effects of different organic amendments on soil organic carbon and its labile fractions in the paddy soil of a double rice cropping sytem. Ying Yong Sheng tai xue bao. *The Journal of Applied Ecology, 31*(7), 2373-2380.
59. Wiedenfeld, B. (2011). Sulfur application effects on soil properties in a calcareous soil and on sugarcane growth and yield. *Journal of Plant Nutrition, 34*(7), 1003-1013.
60. Zarinkolah, Z., Zarabi, M., & Mahdavi, Sh. (2019). *The kinetics of phosphorus release from two calcareous soils treated with different organic sources*.16th Iranian Soil Science Congress. University of Zanjan, Iran, 27-29 August. (In Persian with English abstract)